

Helsinki 7.11.2003

Rec'd PCT/PIO 30 MAR 2005

PCT/FI 03 / 00 684

ETUOIKEUSTODISTUS
PRIORITY DOCUMENT



Hakija
Applicant

Noveltech Solutions Ltd
Lieto

Patenttihakemus nro
Patent application no

20021733

Tekemispäivä
Filing date

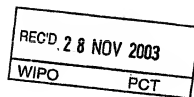
30.09.2002

Kansainvälinen luokka
International class

G01N

Keksinnön nimitys
Title of invention

"Fotoakustinen detektor"



Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä Patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä, patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the description, claims, abstract and drawings originally filed with the Finnish Patent Office.

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED
BUT NOT IN COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) or (b)

PRIORITY

Eija Solja
Eija Solja
Apulaistarkastaja

Maksu 50,- €
Fee 50 EUR

Maksu perustuu kauppa- ja teollisuusministeriön antamaan asetukseen 1027/2001 Patentti- ja rekisterihallituksen maksullisista suoritteista muutoksineen.

The fee is based on the Decree with amendments of the Ministry of Trade and Industry No. 1027/2001 concerning the chargeable services of the National Board of Patents and Registration of Finland.

Osoite: Arkadiankatu 6 A
P.O. Box 1160
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

Puhelin: 09 6939 500
Telephone: + 358 9 6939 500

Telefax: 09 6939 5328
Telefax: + 358 9 6939 5328

BEST AVAILABLE COPY

Fotoakustinen detektori – Fotoakustisk detektor

Keksinnön kohteena on jäljempänä esitettyjen itsenäisten patenttivaatimusten johdanto-osissa esitetty fotoakustinen detektori, fotoakustisen detektorin anturi ja menetelmä fotoakustisessa detektorissa anturina käytettävän oven optimoinnissa.

Kun infrapunasäteily tai valo yleensä osuu kaasutäytteiseen kammioon, jossa on tutkittavaa kaasua osapaineessa p_x ja kantokaasua osapaineessa p_N (tyypillisesti usein tyyppiä), kaasu p_x absorboi säteilyä. Absorptioprosessin jälkeen energia muuttuu lämpöliikkeeksi tietyllä aikavakiolla τ (esim. 10^{-5} s). Tällöin koko kaasun lämpötila nousee ΔT verran aikayksikössä. Lämpötilan nousu aikaansaa myöskin paineen nousun Δp .

Tyypillinen fotoakustinen detektori käsittää kammion, johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun tai pulssitetun infrapunasäteilyn tai valon päästämiseksi kammioon, ja paineanturin, joka on järjestetty mittaamaan absorboituneen infrapunasäteilyn tai valon aikaansaamia painevaihteluita kammiossa. Paineanturi on tyypillisesti mikrofoni, ohut Mylar- tai metallikalvo. Fotoakustista detektoria voidaan käyttää mittaamaan tai havaitsemaan infrapunasäteilyä yleisesti, mutta detektorin eräs spesifinen ja tärkeä käyttö liittyy kaasujen tai kaasuseosten mittaamiseen ja havaitsemiseen liittyen esimerkiksi ilmanlaatuun tai -saasteisiin.

Mikrofoneissa kalvon (Mylar) liikettä mitataan tavallisesti kapasitiivisesti. Mylar – kalvo päällystetään metallilla ja asetetaan lähelle toista kiinteää metallikalvoa. Tällöin syntyy kondensaattori, jonka kapasitanssi on

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{h}, \quad (a)$$

jossa h on kalvojen välinen etäisyys lepotilassa, A kalvojen pinta-ala, $\epsilon_r \epsilon_0$ levyjen välissä olevan kaasun dielektrisyysvakio ja ϵ_0 vastaava tyhjiölle. Mittaamalla C saadaan h , joka antaa Mylar –kalvon liikkeen, koska

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon_r \varepsilon_o A}{3h^2} \Delta h, \quad (b)$$

jossa Δh on etäisyyden muutos keskellä ja $\Delta h/3$ on keskimääräinen etäisyyden muutos. Edelleen

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta h}{h} \quad (c)$$

eli

$$|\Delta h_{\min}| \approx \frac{h}{C/\Delta C} = \frac{h}{S/N}, \quad (d)$$

jossa S/N on mittaavan elektroniikan signaali-kohinasuhde.

Tunnetun tekniikan mukaisia kapasiteettimittauksia rajoittaa levyjen välissä olevan kaasun virtaus, kun h muuttuu. Välin h pienetessä kaasun täytyy virrata levyjen välistä ulos ja takaisin h :n kasvaessa. Virtauksella on hitautta ja se vaatii energiaa. Tästä seuraa, että mitä suurempi on kalvon värähtelykulmataajuus ω ja mitä pienempi h sitä enemmän virtaus pienentää kalvon liikkeen amplitudia. Täten h :ta ei voida pienentää rajattomasti, mikä kasvattaisi signaalia ΔC . Tästä johtuen tunnetut kaupalliset mikrofonit toimivat fysikaalisten lakien rajoilla, eikä niiden herkkyyttä voida parantaa niiltä osin.

Nicolas Lederman et al. esittävät julkaisussaan [1] anturin fotoakustiseen detektoriin, jossa anturi on muodostettu ovimaisesta kalvosta, joka reagoi kaasun liikkeen fotoakustisen detektorin kammiassa, ja johon kalvoon on integroitu pietsosähköinen elementti, joka rekisteröi oven liikkeen. Julkaisussa esitetyn anturin ongelmaksi on se, että oven resonanssitaajuutta ei ole huomioitu. Todennäköisesti anturiin kiinnitetty pietsosähköinen elementti kasvattaa anturin resonanssitaajuutta ja näin ollen huonontaa anturin vastetta. Julkaisussa esitetty anturi on melko epätarkka eikä näin ollen sovellu suurta tarkkuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Julkaisussa ei myöskään ole esitetty fotoakustisen detektorin kammion ja anturin optimointia eli kammion koon suhdetta anturin kokoon.

Myös M. H. de Paula et al. ovat julkaisuissaan [2] ja [3] esittäneet vaihtoehdon perinteiselle kalvoratkaisulle. Julkaisuissa on esitetty fotoakustisen detektorin kammion pienen reiän päälle kieli noin 0,1 millimetrin etäisyydelle reiästä. Julkaisussa esitetyn mukaisesti kieli ei käsitä ns. karmia kielen ympärillä, jolloin kieli ulottuu reiän reunojen ulkopuolelle eli kyseessä ei ole julkaisussa [1] esitetynkaltainen ovi. Perusongelmana de Paula et al.:n julkaisuissa onkin näin ollen se, että fotoakustisen detektorin kammiossa vaikuttava ja mitattava paine kohdistuu vain pieneen osaan kielen kokonaispinta-alasta, mikä pienentää vastetta merkittävästi. Lisäksi vuoto kielen alta on suuri suhteessa reiän kokoon, mikä edelleen alentaa kielen vastetta. Julkaisussa [2] ja [3] on lisäksi esitetty optinen kulmamittaus kielen liikkeen mittaamiseksi. Julkaisuissa esitetyn kielen muoto on kuitenkin käytännössä epäedullinen kulmamittaukselle. Näin ollen julkaisuissa [2] ja [3] esitetty ratkaisu ei ole riittävän herkkä erittäin tarkkoihin mittauksiin ja suurta tarkkuutta vaativiin sovelluskohteisiin.

Lisäksi atomivoimamikroskopiassa käytetään cantilever -tyyppisiä kieliä. Tällöin kieliltä kuitenkin edellytetään korkeita taajuuksia, joten atomivoimamikroskopiassa käytettäviä kieliä ei voida soveltaa fotoakustiseen detektoriin.

Fotoakustisen detektoinnin ongelmana on lisäksi sen häiriintyminen ulkoisista äänistä. Näin ollen, jos kammion sisällä oleva, mittalaitteen ulkopuolelta vuotanut ääni on voimakkaampaa kuin systeemin oma kohina, detektorisysteemin herkkyyden (vasteen) parantaminen ei paranna tutkittavan kaasun määrittystä. Tyypillinen menetelmä ulkoisista äänistä syntyvien häiriöiden vähentämiseksi on äänen eristäminen. Eristämisellä voidaan vaimentaa ulkoääniä kertoimella 10000 – 100000.

Eräs toinen tunnettu keino ulkoisista äänistä aiheutuvien häiriöiden vähentämiseksi on käyttää kaksoisdetektioita, jolla saadaan osittain äänen häiriöitä pienennetyksi. Tunnetuissa kaksoisdetektiojärjestelmissä tehdään identtinen mittaussysteemi varsinaisen mittausjärjestelmän kanssa, johon identtiseen systeemiin ei pääse valoa, ja

joka mittaa pelkästään ääntä kammion sisällä. Sen jälkeen tunnettujen järjestelmien mukaisissa ratkaisuissa vahvistetaan suoraan varsinaisen mittaussignaalin ja identtisen mittaussysteemin antaman referenssisignaalin erotus. Kuvatun kaltaisten kaksoisdetektiojärjestelmien ongelmana on kuitenkin mm. se, että nämä järjestelmät toimivat vain erikoistilanteissa kapealla taajuuskaistalla. Ongelman syynä on mittaussysteemien antureiden välille syntyvä vaihe-ero.

Esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin, fotoakustisen detektorin anturin ja menetelmän fotoakustisessa detektorissa anturina käytettävän oven optimoinnissa tarkoituksena onkin poistaa tai ainakin vähentää edellä mainitusta tekniikan tasosta johtuvia ongelmia.

Lisäksi esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin, fotoakustisen detektorin anturin ja menetelmän fotoakustisessa detektorissa anturina käytettävän oven optimoinnissa tarkoituksena on aikaansaada tarkka ja erittäin herkkä fotoakustinen detektori.

Edelleen lisäksi esillä olevan keksinnön tarkoituksena on saada aikaan fotoakustinen detektori, jossa ulkoisista äänistä syntyvien häiriötekijöiden vaikutusta mittaus tulokseen on vähennetty.

Lisäksi esillä olevan keksinnön erään erittäin edullisen sovellutusmuodon mukaisen fotoakustisen detektorin tarkoituksena on saada aikaan menetelmä fotoakustisen detektorin herkkyyden parantamiseksi ja fotoakustinen detektori, jossa fotoakustisen detektori käsittää ovesta muodostetun anturin, jonka herkkyyttä on parannettu oven resonanssikulmataajuutta alentamalla.

Lisäksi esillä olevan keksinnön erään erittäin edullisen sovellutusmuodon mukaisen fotoakustisen detektorin tarkoituksena on saada aikaan menetelmä fotoakustisen detektorin kammion optimaalisen koon määrittämiseksi.

Lisäksi esillä olevan keksinnön erään erittäin edullisen sovellutusmuodon mukaisen fotoakustisen detektorin tarkoituksena on saada aikaan fotoakustisessa detektorissa käytettävä erittäin herkkä anturi ja menetelmä anturin optimoimiseksi.

5 Mm. edellä mainittujen tarkoitusten toteuttamiseksi keksinnön mukaiselle fotoakustiselle detektorille, fotoakustisen detektorin anturille ja menetelmälle fotoakustisessa detektorissa anturina käytettävän oven optimoinnissa on pääasiassa tunnusomaista se, mikä on esitetty oheisten itsenäisten patenttivaatimusten tunnusmerkiosissa.

10

Tällöin tyypillisessä esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden havaitsemiseksi käsittävät ainakin ensimmäisen kammion seinämään järjestetyn aukon, jonka yhteyteen on kaasun liikkeestä liikkuvaksi järjestetty ovi, ja välineet oven liikkeen kosketuksettomaksi mittaamiseksi.

15 Tässä yhteydessä oven liikkeen kosketuksettomalla mittaamisella tarkoitetaan mitaustointenpiteitä, jotka suoritetaan ilman oveen kiinnitettyjä tai siihen mekaanisessa yhteydessä tai kosketuksessa olevaa yhtä tai useampaa anturia, kuten esimerkiksi ilman oven pintaan kiinnitettyä pietsosähköistä anturia. Eli kosketuksettomassa mittaussessa oveen ei ole kiinnitetty tai yhdistetty sellaisia mittaussvälineitä, jotka häiritisivät ja/tai vaimentaisivat oven liikettä. Tällaisia kosketuksettomia mittaussmenetelmiä ovat esimerkiksi erilaiset optiset mittaussmenetelmät. Lisäksi kosketuksettomaksi mittaussmenetelmäksi katsotaan edellä mainittu kapasitiivinen mittauss, jossa kondensaattorin toiseksi levyksi on järjestetty esillä olevan keksinnön mukainen ovi.

20

25

30

Eräässä edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa oven pinta-ala on korkeintaan yhtä suuri kuin ensimmäiseen kammioon järjestetyn aukon pinta-ala. Aukon pinta-alalla tarkoitetaan tässä yhteydessä aukon kuvitteellisen tasopinnan pinta-alaa. Oven pinta-alalla tarkoitetaan aukon kuvitteelliselle taso-

pinnalle projisoidun oven tasoprojektion pinta-alaa. Tällöin jos oven pinta on esimerkiksi kaareva, voi oven tosiasiallinen pinta-ala olla suurempi kuin aukon pinta-ala, mutta esillä olevan keksinnön mukaisen oven tasoprojektion pinta-ala on tällöinkin pienempi kuin aukon pinta-ala.

Eräässä edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa ovi on ainakin yhdeltä sivulta kiinnitetty oven sivupintoja ympäröivään karmirakenteeseen. Erittäin edullisesti ovi ja karmi on muodostettu piistä esimerkiksi muodostamalla piikiekoon rako, joka kiinnityskohtia lukuun ottamatta erottaa oven kiekon muusta, karmin muodostavasta osasta.

Eräässä edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet oven liikkeen kosketuksettomaksi mittaamiseksi käsittävät: optisen mittausjärjestelyn, joka käsittää ainakin yhden tai useamman valolähteen oven tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman detektorin ovesta heijastuneen valon vastaanottamiseksi ja oven liikkeen mittaamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena, tai kapasitiivisen mittausjärjestelyn, jolloin ovi tai sen osa on päällystetty metallilla tai ovi on valmistettu sähköä hyvin johtavasta aineesta, ja joka mittausjärjestely käsittää oven läheisyyteen järjestetyn metallikalvon tai metallilla päällystetyn kalvon sekä välineet oven ja metallikalvon muodostaman kondensattorin kapasitanssin muutosten mittaamiseksi. Joissakin sovellutuskohteissa järjestelmä voi käsittää myös sekä optisen että kapasitiivisen mittausjärjestelyn. On myös mahdollista, että optisen ja/tai kapasitiivisen mittausjärjestelyn lisäksi fotoakustinen detektori käsittää myös muita mittausjärjestelyjä oven liikkeen kosketuksettomaksi mittaamiseksi.

Erittäin edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa välineet oven liikkeen kosketuksettomaksi mittaamiseksi on järjestetty toiseen kammioon, joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus V , ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion aukon kautta.

Eräässä erittäin edullisessa esillä olevan keksinnön mukaisessa fotoakustisessa detektorissa toisen kammion yhteyteen on lisäksi järjestetty kolmas kammio, joka on kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsittämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla ovella kuin ensimmäisen kammion aukko, jonka oven liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan oven liikettä. Tällöin varsinainen mitaussignaali ja referenssisignaali voidaan mitata erikseen ja laskea niiden amplitudit, joiden erotus antaa tarkan suodatuksen ulkoisista häiriöäänistä.

Tyypillinen esillä olevan keksinnön mukainen fotoakustisen detektorin anturi käsittää levymäisen, oven karmina toimivan reunaosan ja levymäisestä reunaosasta raol-la erotetun oven. Edullisesti anturi on järjestettävissä fotoakustisen detektorin käsittämän tutkittavaa kaasua sisältävän kammion yhteyteen siten, että kammiossa absorboituneen infrapunäteilyn ja/tai valon aikaansaamat painevaihtelut liikuttavat ovea.

Esillä olevan keksinnön mukaisen erittäin edullisen sovellutusmuodon mukainen anturi ei käsitä siihen kiinteästi kiinnitettyjä ja/tai kiinteästi sen yhteyteen järjestettyjä antureita oven liikkeen havaitsemiseksi ja/tai mittaamiseksi.

Esillä olevan keksinnön suurimpana etuna on sen tarkkuus ja herkkyyys tyypisiin tunnettuihin fotoakustisiin detektoreihin verrattuna.

Lisäksi esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin ja fotoakustisen detektorin anturin etuna on niiden yksinkertainen rakenne ja pieni koko.

Esillä olevan keksinnön mukaisen menetelmän fotoakustisen detektorin anturina käytettävän oven optimoinnissa suurimpana etuna on menetelmän tarkkuus ja help-

po sovellettavuus fotoakustisen detektorin ja erityisesti siinä käytettävän oven optimoinnissa.

Keksintöä selostetaan seuraavassa lähemmin viittaamalla oheiseen piirustukseen, jossa

- Kuvio 1 esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin rakennetta,
- Kuvio 2 esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia yläviistosta,
- Kuvio 3a esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturia edestä,
- Kuvio 3b esittää kaaviomaisesti keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin paineanturin poikkileikkausta,
- Kuvio 4a esittää kaaviomaisesti resonanssikulmataajuuden ω_0 vaikutusta amplitudiin $A_x(\omega)$,
- Kuvio 4b esittää kaaviomaisesti oven resonanssin mallinnusta
- Kuvio 5 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven kulmamuuutoksen perusteella,
- Kuvio 6 esittää kaaviomaisesti valotehoa kaksoisanturilla kuvion 5 mukaisessa mittausjärjestelyssä,
- Kuvio 7 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä oven translaatiomittauksen perusteella,
- Kuvio 8 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä perustuen Michelsonin interferometrin käyttöön,
- Kuvio 9 esittää kaaviomaisesti kuvion 8 mukaisessa mittausjärjestelyssä kolmoisanturille syntyvää interferenssiuovaa,
- Kuvio 10 esittää kaaviomaisesti tangentin epäjatkuvuuskohtia,

Kuvio 11 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven erästä edullista muotoa,

Kuviot 12a ja 12b esittävät kaaviomaisesti eräitä vaihtoehtoisia esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin oven muotoja, ja

5 Kuvio 13 esittää kaaviomaisesti esillä olevan keksinnön mukaista paineanturin oven liikkeen mittausjärjestelyä moninkertaiseen heijastukseen perustuvan optisen kertojan avulla.

10 Kuviossa 1 on kaaviomaisesti esitetty esillä olevan keksinnön mukaisen fotoakustisen detektorin eräs suoritusmuoto. Kuviossa esitetyn mukaisesti fotoakustinen detektori käsittää kaasutäytteiset kammiot V ja V_0 , joissa on tai joihin voidaan johtaa tutkittavaa kaasua osapaineessa p_x ja kantokaasua osapaineessa p_N (tyypillisesti usein tyyppiä). Ensimmäinen kammio V_0 on muodostettu rengasmaisesta runkosasta 1, jonka ensimmäiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion ensimmäisen
15 pään sulkeva ikkuna 2, jonka läpi infrapunasäteily tai valo yleensä voidaan johtaa kammioon. Ikkuna 2 on edullisesti valmistettu hyvin infrapunasäteilyä ja/tai valoa läpäiseväksi ja sen paksuun on edullisesti noin 3 – 6 mm. Kammion V_0 mitoitus ja sen optimointi on tarkemmin esitetty alla. Kammion V_0 toiseen avoimeen päähän on järjestetty kammion toisen pään ainakin osittain sulkeva, paineanturina toimiva
20 piiovi 3, jonka rakenne on tarkemmin esitetty kuvioissa 2 ja 3. Piioven 3 tilalla voidaan joissakin erityisissä sovellutuksissakäyttää myös mikrofonia, ohutta Mylar- tai metallikalvoa. Fotoakustinen detektori käsittää ensimmäisen kammion V_0 toisen pään jatkeeksi järjestetyn toisen kammion V, joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus V. Mittaustilaan on järjestetty piioven 3 liikkeen mittausvälineet. Mittaustilan toinen pää on kuviossa 1 esitetyn mukaisesti suljettu referenssijärjestelmällä,
25 joka käsittää toisesta päästä suljetun referenssikammion V_0 , joka on kooltaan identtinen ensimmäisen kammion V_0 kanssa. Referenssikammion ensimmäinen pää on suljettu vastaavalla piiovella kuin ensimmäinen kammiokin.

Kuviossa 2, 3a ja 3b on esitetty kaaviomaisesti ja esimerkinomaisesti eräs edullinen esillä olevan keksinnön mukainen paineanturina toimiva piistä valmistettu ovi. Paineanturi käsittää levymäisen, oven karmina toimivan reunaosan ja levymäisestä osasta uralla erotetun oven. L on oven leveys, h korkeus, d paksuus ja Δ raon leveys.

Pienillä ikkunan läpi kammioon johdettavilla valolähteen IR-tehoilla tasapainotilassa, kun $W(t) = W_{av} + W_0 \cos(2\pi f t)$, on

$$\left(\frac{dT}{dt} \right)_{\tau_0} = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \cos(2\pi f t)}{\sum_i c_v^i m_i} = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \cos(2\pi f t)}{V_0 \sum_i c_v^i \rho_i}, \quad (1)$$

jossa a_x on osapaineessa p_x olevan kaasun absorptiokerroin, l kammion pituus, α IR-säteen ja kammion keskiakselin välinen kulma ja $W(t)$ nettovaloteho, joka menee kammioon. Eli $W(t)$ on valon intensiteetti $\times \pi R^2$, jossa R on kammion säde. m_i on kaasukomponentin massa, c_v^i on vastaavan kaasun ominaislämpökapasiteetti, ρ_i on kaasun i tiheys ja V_0 on pienemmän kammion tilavuus. Esimerkiksi

$$\sum_i c_v^i m_i = c_v^x m_x + c_v^N m_N = V_0 (c_v^x \rho_x + c_v^N \rho_N).$$

Yhtälössä (1) on oletettu, että $\tau \ll f^{-1} \ll \tau_0$, jossa τ_0 on aikavakio lämmönjohtumiselle ulos kammioista ja τ aikavakio absorptioenergian muuttumiselle lämmöksi. Edelleen

$$\Delta T = T(t) - T_0 = \int \left(\frac{dT}{dt} \right)_{\tau_0} dt = \frac{a_x p_x 2l (\cos \alpha)^{-1} W_0 \sin(2\pi f t)}{2\pi f V_0 \sum_i c_v^i \rho_i}. \quad (2)$$

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä saadaan

$$\frac{dp}{p_0} + \frac{dV}{V_0} = \frac{dT}{T_0}. \quad (3)$$

Paineanturissa:

$$\begin{aligned} dV &= \frac{1}{2} x A \\ Adp &= kx = F, \end{aligned} \quad (4)$$

jossa A on paineanturin pinta-ala, k on jousivakio ja x on liike. Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan

$$x = \frac{\frac{\Delta T/T_0}{k} + \frac{A}{Ap_0 + 2V_0}}{\quad} \quad (\omega = 0). \quad (5)$$

Koska yhtälössä (2) esitetty ΔT on moduloitu kulmataajuudella ω , täytyy tarkastella oven (tai kalvon) liikeyhtälöä eli

$$m\ddot{x} - 2\beta m\dot{x} + \underbrace{m\omega_0^2}_k x = F_0 e^{i\omega t}, \quad (6)$$

jossa $F_0 e^{i\omega t}$ on pakkovoima, β vaimennusvakio, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ resonanssikulmataajuus ja x liike joko oven päästä tai oven tai kalvon keskeltä. Yhtälön (6) ratkaisu

$$x = \frac{(F_0/m)e^{i\omega t}}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega\beta}, \quad (7)$$

josta saadaan amplitudi

$$\sqrt{x^* x} = A_x(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}. \quad (8)$$

Yhtälöistä (3) ja (4) saadaan amplitudeille

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{1}{2} A_x(\omega) \frac{A}{V_0}$$

ja täten

$$A_x(\omega) = \frac{A \Delta p / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} = \frac{Ap_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} - \frac{A_x(\omega)A}{2V_0} \right)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

josta

$$A_x(\omega) = \frac{Ap_0 \frac{\Delta T}{T_0}}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} + \frac{p_0 A^2}{2V_0}}. \quad (9)$$

Kuviossa 4a on kaaviomaisesti esitetty resonanssikulmataajuuden ω_0 vaikutus oven amplitudiin $A_x(\omega)$.

Jos $\omega = 0$, niin yhtälö (9) antaa yhtälön (5) eli $A_x(0) = x$, koska $m\omega_0^2 = k$.

5

Oven (tai kalvon) resonanssi on edullista mallintaa niin, ettei resonanssin tuomaa amplitudin kasvua ω_0 :n ympärillä huomioida (katso kuvio 4b). Siis jos $\omega < \omega_0$, on

10

$$A_x(\omega) = \frac{A p_0 \Delta T / T_0}{m\omega_0^2 + \frac{p_0 A^2}{2V_0}} = \frac{\frac{p_0 \Delta T / T_0}{A}}{\frac{m\omega_0^2}{A} + \frac{p_0 A}{2V_0}} = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (10)$$

ja jos $\omega > \omega_0$, on

15

$$A_x(\omega) = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}}, \quad (11)$$

joissa ρ on oven (tai kalvon) tiheys ja d paksuus. Jos resonanssia ei hyödynnetä, ovea (tai kalvoa) kannattaa käyttää resonanssikulmataajuuden ω_0 alapuolella eli yhtälössä (10), josta nähdään, että oven (tai kalvon) liikkeen amplitudin $A_x(\omega)$ optimointi, eli maksimointi, tulee tehdä ω_0 :n, d :n, V_0 ja A :n avulla. Mitä pienempiä ω_0 ja A

20

ovat, sitä suurempi $A_x(\omega)$ on. Amplitudi saavuttaa maksimin, kun $\rho d \omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}$ saavuttaa minimin. Näin tapahtuu, kun

$$\rho d \omega_0^2 = \frac{p_0 A}{2V_0} \quad (12)$$

ja

25

$$A_x^{opt}(\omega) = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{2 \rho d \omega_0^2} = \frac{p_0 \Delta T / T_0}{2 \frac{p_0 A}{2V_0}}. \quad (13)$$

Yhtälöiden (1) ja (2) avulla saadaan yhtälöstä (13)

$$A_x^{opt}(\omega) = \frac{p_0 \alpha_x p_v l (\cos \alpha)^{-1} W_0}{T_0 \omega V_0 \sum_i c_v^i \rho_i \rho d \omega_0^2}, \quad (14)$$

jossa $\omega \leq \omega_0$. Yhtälöstä nähdään, että vastetta voidaan kasvattaa parhaiten pienentämällä kulmataajuuksia ω ja ω_0 . Mutta on muistettava, että ilman termin $\frac{p_0 A}{2V_0}$

- 5 huomioimista ja optimointia, ei saavuteta parasta mahdollista optimointitulosta. Näin ollen optimointia voidaan ja tyypillisesti tuleekin tehdä optimoimalla myös tekijöitä A ja/tai d . Tyypillisillä kaupallisesti saatavilla mikrofoneilla resonanssitaajuus $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ on tyypillisesti 10 – 20 kHz. Jos käytetään mikrofonia, jonka resonanssitaajuus $f_0 = 20$ kHz, lähellä resonanssitaajuutta, saadaan $A_x^{opt}(20 \text{ kHz})$. Jos
- 10 samanlaisesta kalvosta rakennetaan uusi mikrofoni, jonka resonanssitaajuus $f_0 = 500$ Hz, niin

$$A_x^{opt}(500 \text{ Hz}) = \left(\frac{20 \text{ kHz}}{0,5 \text{ kHz}} \right)^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 40^3 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}) = 64000 A_x^{opt}(20 \text{ kHz}), \quad (15)$$

- 15 jos mikrofoni on optimoitu yhtälön (12) mukaisesti. Jos edelleen käytettäisiin taajuudelle 500 Hz optimoitua mikrofonia 50 Hz:n taajuudella, vaste kasvaisi edelleen kymmenkertaiseksi ja parannuskerroin olisi siis 640000. Resonanssitaajuutta voidaan alla olevan yhtälön (16) perusteella pienentää ohentamalla ovea (tai kalvoa). Tällöin saadaan lisää parannusta suhteessa d_1/d_2 tilanteissa, joissa oven tai kalvon
- 20 ohentaminen on teknisesti mahdollista.

Resonanssikulmataajuudet riippuvat oven (tai kalvon) dimensioista ja materiaalista. Ovelle

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2E}{3\rho}} \frac{d}{L^2}, \quad A = Lh, \quad (16)$$

25 jossa E on materiaalin Youngin moduli, ρ tiheys, L oven leveys, h korkeus ja d paksuus.

Ympyränmuotoiselle metallikalvolle, jossa ei ole jännitystä

$${}_E \omega_0 = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \frac{4d}{r^2}, \quad (17)$$

jossa σ = Poissonin suhde ja r kalvon säde.

5

Jännitettylle ohuelle kalvolle (esimerkiksi Mylar)

$${}_r \omega_0 = \frac{2.4\sqrt{T/\mu}}{r} = \frac{2.4}{r} \sqrt{\frac{F}{2\pi r \rho d}}, \quad (18)$$

10 jossa T on kalvon jännitys ja μ massa/yksikköala eli ts. $\mu = m/a = \rho d A/A = \rho d$.

Tarkkaan ottaen ohuellekin kalvolle (Mylar 2 μm) on

$$\omega_{\text{tot}}^2 = {}_E \omega_0^2 + {}_r \omega_0^2, \quad (19)$$

15 jossa kuitenkin ${}_E \omega_0^2 \ll {}_r \omega_0^2$.

Jos verrataan samasta materiaalista (piistä) valmistettua esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritus esimerkin mukaista ovea, jonka korkeus on L/s , ympyrämuotoiseen kalvoon, jossa ei ole jännitystä, saadaan

20

$$\frac{A_{\text{ovi}}^{\text{opt}}}{A_{\text{kalvo}}^{\text{opt}}} \approx s\pi \left[\frac{8}{s\pi(1-\sigma^2)} \right]^{1/3} \approx 20, \quad (20)$$

jos $s = 10$ eli oven korkeus on kymmenesosa leveydestä L .

25

Verrattaessa esillä olevan keksinnön erään edullisen suoritus esimerkin mukaista ovea jännitettyyn Mylar-kalvoon, jota tyypillisesti käytetään tunnetun tekniikan mukaisissa mikrofoneissa, saadaan

$$\frac{A_{\text{ovi}}^{\text{opt}}}{A_{\text{Mylar}}^{\text{opt}}} \approx 43 \left(\frac{F}{N} \right)^{2/5}, \quad (21)$$

30

jossa F on kokonaisjännittävä voima Newtonina ja $s = 10$. Suhde on tyypillisesti 10 – 20 riippuen siitä, kuinka pienellä voimalla F kalvo on saatu toimivaksi.

5 Esillä olevan keksinnön mukainen ovi on siis ratkaisu, joka antaa vähintään yhden kertaluvun paranemisen anturin vasteessa. Jos tämä parannus lisätään kulmataajuuden antamaan parannukseen, voidaan matalaresonanssilla ovelta saada aikaan erittäin edullisesti muutaman miljoonan parannus anturin vasteeseen.

10 Esillä olevan keksinnön erään sovellutusmuodon mukaista ovi-anturia käyttäen oven ja seinämän välinen rako saatava edullisesti mahdollisimman kapeaksi. Kammiomuotaa raosta, mistä seuraa, että anturilla on alarajataajuus f_{cut} , jonka määrää oven raon pinta-ala a seuraavasti:

$$f_{cut} \propto v_0 \frac{a}{V_0}, \quad (22)$$

15 jossa v_0 on äänennopeus kammiossa ja $V \gg V_0$.

20 Toisaalta on edullista, että kammioiden välillä on pieni reikä, joka tasaa hitaat painevaihtelut kammioiden välillä, ja joka reikä voidaan siis toteuttaa edellä mainittuna rakona oven ja oven karmin välissä.

25 Fotoakustisen anturin tarkkuutta voidaan parantaa myös korvaamalla tunnetun tekniikan mukainen kapasitiivinen oven (tai kalvon) liikkeen mittaaminen esillä olevan keksinnön mukaisella optisella mittaajajärjestelyllä. Optinen mittaaminen häiritsee erittäin vähän oven (tai kalvon) liikettä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti liikettä voidaan mitata joko oven (tai kalvon) kulman tai oven (tai kalvon) jonkin pisteen translaatioliikkeen avulla.

30 Kuviossa 5 on esitetty kulmamittaukseen perustuva mittaajajärjestely, jossa käytetään laserilla 10 toteutettua optista viisaria kaksoisanturin 11 ollessa detektorina.

Mittausjärjestely käsittää anturina toimivan oven 3 lisäksi valolähteenä toimivan laserin 10, optisen linssin 12 valonsäteen kohdistamiseksi ja kaksoisanturin 11 ovesta 3 heijastuneen valonsäteen v vastaanottamiseksi ja mittaamiseksi. Kaksoisanturi käsittää siis ensimmäisen detektorin d1 ja toisen detektorin d2. Valonsäteen v fokus 13 on kaksoisanturilla. Kuviossa 6 on esitetty mittausjärjestelyn valoteho kaksoisanturilla, jossa jokaisessa y:n pisteessä on valon intensiteetti integroitu y:tä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Kuvioissa 5 ja 6 esitetyn kulmamittauksen kulman muutos $\Delta\alpha$ muunnetaan translaatioliikkeeksi $\Delta y = a2\Delta\alpha$, joka mitataan kaksoisanturilla d_1d_2 . Kulma $\Delta\alpha$ on keskimääräinen kulmamuuutos lasersäteen valaisemalla alueella ovesta. Yleisesti $\Delta\alpha$ riippuu mittauspaikasta eli l :stä

$$\tan \Delta\alpha = \frac{FL^2}{6EI} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{8EI\Delta x L^2}{6L^3 EI} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right] = \frac{4\Delta x}{3L} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (27)$$

eli

$$\Delta y = 2a \frac{4\Delta x}{3L} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right]. \quad (28)$$

Pienin liike, joka voidaan mitata kaksoisanturilla on

$$\Delta y_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)}, \quad (29)$$

jossa σ on laserfokuksen puoliarvo. Minimissään σ on diffraktion rajoittama eli

$$\sigma = \frac{\lambda}{D} (a+b). \quad (30)$$

Tällöin havaittava minimiliike oven päässä on

$$\Delta x_{\min} = \frac{3L\Delta y_{\min}}{8a \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{2D(S/N)8a \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right]} = \frac{3L\lambda(a+b)}{16aD \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right] (S/N)}. \quad (31)$$

Valaistun alueen leveys ovelsa on $aD / [(a+b) \cos \beta]$, mikä antaa lopullisen rajoituksen. Jos $b \approx 0$ ja $l \approx L$, niin edellisestä yhtälöstä saadaan

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3L\lambda}{16D(S/N)}. \quad (32)$$

5 Käytännössä $D \lesssim L$, eli

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{3\lambda}{16(S/N)}, \quad (33)$$

jossa S on laserin teho I_0 ja N valon ja elektronikan summakohina.

10 Signaalin (valotehon vaihtelun) amplitudi

$$A_v = \Delta P_{d_1} - \Delta P_{d_2} = 2\Delta y I_{\max}, \quad (34)$$

jossa ΔP_{d_1} ja ΔP_{d_2} ovat valotehon muutokset detektoreilla d_1 ja d_2 sekä I_{\max} on maksimivaloteho / Δy . Nyt yhtälön (28) avulla

$$15 \quad A_v = a \frac{16A_x I_{\max}}{3L} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right] \approx \frac{16aA_x}{3L} \frac{P_{d_1} + P_{d_2}}{\sigma} \left[1 - \left(\frac{L-l}{L} \right)^3 \right], \quad (35)$$

jossa $P_{d_1} + P_{d_2} = I_0$ on kaksoisanturille osuvan laserin valoteho.

20 Siis optisen viisarin valosignaalin amplitudi on

$$A_v = \frac{16aDI_0A_x}{3L\lambda(a+b)} \approx \frac{16I_0A_x}{3\lambda}, \quad (36)$$

jossa A_x on oven liikkeen x amplitudi, jonka on oltava $< \lambda$.

25

Esillä olevan keksinnön mukaisen optisen viisarin etuna on mm. sen yksinkertainen rakenne, se ei häiritse oven liikettä ja kaksoisanturi vaimentaa laserin valon fotonikohinaa. Edullisesti laserin valoläikän koko ovelsa on suuri, $D \approx L$, jotta σ olisi pieni. Esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria voidaan käyttää myöskin kalvon liikkeen mittaamiseen, jolloin optimaalinen mittauspaiikka on

30

$$r/\sqrt{3}.$$

Oven liike voidaan esillä olevan keksinnön mukaisesti mitata siis myös translaatiomittauksena. Kuviossa 7 on esitetty esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely, joka ei ole kulmamittaus ja jolla oven translaatioliike x voidaan mitata. Mittausjärjestely käsittää oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, kaksoisanturin 11, ensimmäisen optisen linssin 12 valonsäteen fokuksen kohdistamiseksi lepotilassa eli liikkumattomassa tilassa olevan oven 3 pinnalle ja toisen optisen linssin 12 ovesta heijastuvan valonsäteen kohdistamiseksi kaksoisanturille. Valonlähde, optiset linssit ja kaksoisanturi on järjestetty siten, että kun ovi on lepotilassa on ovele tulevan ja siitä heijastuvan valonsäteen välinen kulma 90 astetta. Mittauksen etuna on mm. se, että lasersäde on fokuksessa oven pinnalla ja oven optinen laatu voi olla huono. Minimiliike, joka mittausjärjestelyllä voidaan havaita on

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{\sqrt{2}a\lambda}{4D(S/N)}, \quad (37)$$

jos ovelsa on peilipinta.

Minimiliike on samaa suuruusluokkaa kuin kulmamittauksessa eli $\Delta x_{\min} = \lambda / (S/N)$, jos $D = \sqrt{2}a/4$. Myös translaatiomittaus soveltuu myös kalvon liikkeen mittaukseen.

Oven (tai kalvon) liikettä voidaan mitata esillä olevan keksinnön erään edullisen sovellutusmuodon mukaisesti optisesti myös interferometriä käyttämällä. Kuviossa 8 on esitetty eräs esillä olevan keksinnön mukainen mittausjärjestely oven (tai kalvon) liikkeen mittaamiseksi ns. Michelsonin interferometrillä. Kuviossa esitetyn mukaisesti järjestely käsittää itse oven lisäksi valonlähteenä toimivan laserin 10, optisen linssin 12 lasersäteen kohdistamiseksi, säteenjakajan 15 eli puoliläpäisevän peilin lasersäteen jakamiseksi ovele 3 ja referensspeilille 16, referensspeilin 16 ja kolmoisanturin 17 säteenjakajalta 15 tulevien lasersäteiden vastaanottamiseksi. Kuviossa esitetyn mukaisesti lasersäde on likimain fokuksessa sekä ovelsa että refe-

renssipeilissä. Referenssipeiliä 16 säädetään siten, että kolmen anturin d_1 , d_2 ja d_3 muodostamalle kolmoisanturille 17 syntyy $\frac{3}{4}$ paperitasoa vastaan kohtisuorasta interferenssijuovasta. Kun x muuttuu oven liikkeessa, interferenssijuova liikkuu sivuttaisen detektorien yli, kuten kuviossa 9 on esitetty. Juova liikkuu yhden juovan välin, kun x muuttuu $\lambda / 2$:n verran. Juovan intensiteettijakauma on

$$I(z) = \frac{1}{2} A \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{z}{D} \right) \right]. \quad (38)$$

Jos interferenssijuova liikaa ε :n verran, saadaan antureiden d_1 , d_2 ja d_3 signaalit I_1 , I_2 ja I_3 seuraavasti:

$$I_1(\varepsilon) = \int_{-\frac{D}{4} + \varepsilon}^{\frac{D}{4} + \varepsilon} \frac{A}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{z}{D} \right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[-\cos \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) + \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \right], \quad (39)$$

$$I_2(\varepsilon) = \int_{\frac{D}{4} + \varepsilon}^{\varepsilon} \frac{A}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{z}{D} \right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[\cos \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) + \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \right] \quad \text{ja} \quad (40)$$

$$I_3(\varepsilon) = \int_{\varepsilon}^{\frac{D}{4} + \varepsilon} \frac{A}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{z}{D} \right) \right] dz = \frac{AD}{2 \cdot 4} + \frac{AD}{2 \cdot 2\pi} \left[\cos \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) - \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \right]. \quad (41)$$

Tällöin

$$\begin{cases} I_2(\varepsilon) - I_1(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \cos \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \\ I_2(\varepsilon) - I_3(\varepsilon) = \frac{AD}{2\pi} \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \end{cases} \quad (42)$$

eli

$$\frac{2\pi\varepsilon}{D} = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (43)$$

Koska $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$, niin

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}. \quad (44)$$

Koska signaalit $I_2 - I_1$ ja $I_2 - I_3$ ovat 90° :n vaiheessa toistensa suhteen, niiden avulla voidaan selvittää kuviossa 10 esitettyjen tangenttifunktion epäjatkuvuuskohtien yli. Eli yhtälössä

$$\Delta x = \left(k + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{I_2 - I_3}{I_2 - I_1} \right\}$$

saadaan mitatuksi kokonaisluvun k muutokset ± 1 tangentin epäjatkuvuuskohdissa $\phi = (n + \frac{1}{2})\pi$.

Pienin havaittava liike on

$$\Delta x_{\min} = \frac{\sigma}{2(S/N)} = \frac{\lambda}{8(S/N)}, \quad (45)$$

jossa $S = I_0/2$.

Jos oven liike on pieni $< \lambda/4$, voidaan edellä kuvatus mittausjärjestelyn kolmoisan-turin tilalla käyttää kaksoisanuria kuten optisessa viisarissa. Tällöin anturien yhteisen leveys on yhden juovan leveys ja

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = \frac{AD}{2} = \frac{I_0}{2} \\ I_1 - I_2 = \frac{AD}{\pi} \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{D} \right) \end{cases} \quad (46)$$

Koska $\varepsilon = \Delta z = 2D\Delta x/\lambda$ on

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right\} \approx \frac{\lambda}{8} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{\lambda}{4I_0} (I_1 - I_2), \quad (47)$$

jossa I_0 on laserin valoteho. Tällöin valosignaalin amplitudi on

$$A_I = I_1 - I_2 \approx 4 \frac{I_0 A_x}{\lambda}, \quad (48)$$

jossa A_x on oven liikkeen x amplitudi.

Esillä olevan keksinnön mukaisen interferometrisen mittauksen etuja ovat mm: Yhtälön (44) mukaisesti vaste on erittäin lineaarinen jopa silloin kun oven (tai kalvon) liike on useita aallonpituuksia. Absoluuttinen tarkkuus on hyvä, koska interferenssisignaalin muoto on tarkasti $1/2(1+\cos(2\pi z/D))$ -muotoinen. Lisäksi laser voidaan fokusoida oven mittauspisteeseen lähes pistemäisesti eikä diffraktio vaikuta tulokseen. Myöskään laserin intensiteetin I_0 vaihtelu ei vaikuta mittaustuloksen arvoon, koska yhtälössä (44) interferenssijuovan maksimi-intensiteetin A arvo supistuu pois.

Verrattaessa optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että yhtälö (33) ei toteudu käytännössä, koska neliön muotoinen (suorakulmainen) ovi ei ole optimaalinen muoto optimoitaessa yhtälöä (10). Eli toisin sanoen esillä olevan keksinnön mukainen optinen viisari ja interferometri toimivat erittäin hyvin myös neliön muotoisella (suorakulmaisella) ovella, mutta jos herkkyyttä ja tarkkuutta halutaan edelleen parantaa, tulee oven muotoa muuttaa. Käytettäessä ovea, jonka korkeus on kymmenesosa leveydestä L (eli $s = 10$), yhtälö (31) antaa kuviossa 11 esitetyn mukaisesti

$$\Delta x_{\min} = \frac{3L\lambda}{16L/10(s/N)} \approx \frac{2\lambda}{s/N}, \quad (49)$$

joka on 16-kertainen vastaavaan interferometrin arvoon verrattuna (yht. (45)). Edelleen interferometri paranee optiseen viisariin verrattuna, jos s kasvaa eli ovi madaltuu, mikä toisaalta lisää myös oven liikkeen amplitudia $A_x(\omega)$.

Oven muotoa voidaan parantaa lisää esimerkiksi pienentämällä edelleen resonanssitajuutta heikentämällä oven saranaa saranan keskiosaa urittamalla, kuten kuviossa 12a on esitetty ja/tai lisäämällä oven pinta-alaa oven päässä, kuten kuviossa 12b on esitetty. Kuviossa 12b esitetty oven malli soveltuu erityisen hyvin interferometrin kertojaratkaisuun, joka on tarkemmin esitetty alla. Kuviossa 12b esitetty ovi voidaan toteuttaa myös käyttäen useampaa kuin yhtä vartta, jolloin oven jäykkyys kasvaa ja oven kiertyminen oveen kohdistuvan paineen vaikutuksesta näin ollen pienenee. Ovi voidaan esillä olevan keksinnön mukaisesti toteuttaa myös esimerkiksi

siten, että pinta-alaltaan aukon pinta-alaa pienempi ovi on saranoitu käyttäen pitkää vartta, jolloin vartena voi toimia esimerkiksi kuviossa 12a esitetyn mukainen rakenne, jolloin ovi on kiinnitetty varren päähän tai muodostettu osaksi varren päätyosaa. Pitkän varren etuna on se, että pitkän varren käyttö alentaa oven resonanssia.

5

Koska käytettäessä interferometriä ovesta on lähes pistemäinen lasertäplä, voidaan interferometrissä soveltaa monikertaista heijastusta, eli kertojaa, kuviossa 13 esitetyn mukaisesti. Laservalo v menee päätypeiliin heijastuen n -kertaa ovesta 3 ja oven läheisyyteen järjestetystä kiinteästä tasopeilistä 20, joka on edullisesti järjestetty samansuuntaiseksi ovipinnan kanssa. Laserin fokus on lähellä päätypeiliä 21, josta lasersäde tulee takaisin samaa reittiä heijastuen toiset n -kertaa ovesta. Jos ovi liikahtaa matkan Δx , optinen matka muuttuu interferometrissä $4n\Delta x$ verran ja vaste kasvaa $2n$ -kertaiseksi, jos ei ole heijastustappioita.

10

15 Jos peilien ja oven heijastuskerroin on R , niin yhtälö (45) saa nyt uuden muodon:

$${}_R x_{\min} = \frac{\lambda}{2nR^{4n-2}g(S/N)} = \frac{x_{\min}}{2nR^{4n-2}}. \quad (50)$$

20

Tällä menetelmällä saadaan noin 10-kertainen herkkyyden lisäys. Monikertaista heijastusta voidaan soveltaa myöskin esillä olevan keksinnön mukaisessa translaatiomittauksen laserheijastuksessa, koska laser on fokuksessa ovesta.

25

Verrattaessa esillä olevan keksinnön mukaista optista viisaria ja interferometriä toisiinsa, voidaan todeta, että molemmilla esillä olevan keksinnön mukaisilla mittausjärjestelyillä saavutetaan olennainen parannus mittauksen tarkkuuteen ja herkkyyteen. Interferometrinen mittaus on vielä jonkin verran tarkempi kuin optinen viisari, mutta samalla mittausjärjestely on hivenen monimutkaisempi. Näin ollen tulee sovellus- ja tapauskohtaisesti harkita tarvittava herkkyyys ja valita käytettävä mittausmenetelmä.

30

- Kuten edellä todettiin, on tunnettujen fotodetektoreiden ongelmana niiden häiriintyminen ulkoisista äänistä. Esillä olevan keksinnön mukaisesti ulkoisten äänten vaikutusta voidaan vähentää sinänsä tunnetulla kaksoisdetektorilla, joka on esitetty kuviossa 1. Esillä olevan keksinnön mukaisesti varsinainen mittaussignaali ja referenssisignaali mitataan erikseen ja lasketaan niiden amplitudit, joiden erotus antaa tarkemman ja paremman suodatuksen ulkoisista häiriöäänistä. Erityisesti taajuusalueella, jossa ei ole kaasun aiheuttamaa signaalia, saadaan häiriöääntä oleellisesti vähennettyä.
- 5
- 10 Keksintöä ei ole pyritty mitenkään rajoittamaan vain edellisessä selityksessä esitettyyn suoritusmuotoon, vaan sitä voidaan vaihdella patenttivaatimusten esittämän keksinnöllisen ajatuksen puitteissa.

Kirjallisuusviitteet:

- [1] Nicolas Ledermann et al., *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 35, pp. 177-184 (2001)
- [2] M.H. de Paula et al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, 3722-3724 (1988)
- 5 [3] M.H. de Paula et al., *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 63, 3487-3491 (1992)

Patenttivaatimukset:

1. Fotoakustinen detektori, joka käsittää ainakin

- ensimmäisen kammion (V_0), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa,

- ikkunan moduloidun ja/tai pulssitetun infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon (V_0), ja

- välineet absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden havaitsemiseksi, **tunnettu** siitä, että välineet absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden havaitsemiseksi käsittävät ainakin

- ensimmäisen kammion (V_0) seinämään järjestetyn aukon, jonka yhteyteen on kaasu-
liikkeestä liikkuvaksi järjestetty ovi, ja

- välineet oven liikkeen kosketukseksi mittaamiseksi.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että oven pinta-ala on korkeintaan yhtä suuri kuin ensimmäiseen kammioon (V_0) järjestetyn aukon pinta-ala.

3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että ovi on ainakin yhdeltä sivulta kiinnitetty oven sivupintoja ympäröivään karmirakenteeseen.

4. Jonkin edellä mainitun patenttivaatimuksen mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että ovi ja karmi on muodostettu piistä.

5. Jonkin edellä mainitun patenttivaatimuksen mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että välineet oven liikkeen kosketukseksi mittaamiseksi käsittävät:

- optisen mittausjärjestelyn, joka käsittää ainakin yhden tai useamman valolähteen oven tai sen osan valaisemiseksi ja yhden tai useamman detektorin ovesta heijastu-

neen valon vastaanottamiseksi ja oven liikkeen mittaamiseksi optisena kulma- ja/tai translaatiomittauksena, tai

- kapasitiivisen mittausjärjestelyn, jolloin ovi tai sen osa on päällystetty metallilla tai ovi on valmistettu sähköä hyvin johtavasta aineesta, ja joka mittausjärjestely käsittää oven läheisyyteen järjestetyn metallikalvon tai metallilla päällystetyn kalvon sekä välineet oven ja metallikalvon muodostaman kondensaattorin kapasitanssin muutosten mittaamiseksi.

6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että optisen mittausjärjestelyn valolähde on laser.

7. Patenttivaatimuksen 5 tai 6 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että optisen mittausjärjestelyn detektori on kaksoisanturi.

8. Jonkin patenttivaatimuksen 5 - 7 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että valolähde ja detektori on järjestetty osaksi interferometriä.

9. Jonkin patenttivaatimuksen 5 - 8 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että välineet oven liikkeen kosketuksettomaksi mittaamiseksi on järjestetty toiseen kammioon (V), joka muodostaa mittaustilan, jolla on tilavuus V, ja joka on yhteydessä ensimmäiseen kammioon ensimmäisen kammion aukon kautta.

10. Patenttivaatimuksen 9 mukainen fotoakustinen detektori, **tunnettu** siitä, että toisen kammion yhteyteen on lisäksi järjestetty kolmas kammio, joka on kooltaan identtinen ensimmäisen kammion kanssa, ja jossa on ensimmäisen kammion käsittämän aukon kanssa identtinen aukko, joka yhdistää kolmannen kammion toiseen kammioon, joka kolmannen kammion aukko on suljettu vastaavalla ovella kuin ensimmäisen kammion aukko, jonka oven liikettä mitataan vastaavalla tavalla kuin ensimmäisen kammion aukon sulkevan oven liikettä, sekä välineet ensimmäisen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun varsinaisen mittaussignaalin ja

kolmannen kammion aukkoon järjestetystä anturista mitatun referenssisignaalin amplitudien laskemiseksi ja niiden erotuksen aikaansaamiseksi.

11. Fotoakustisen detektorin anturi, **tunnettu** siitä, että anturi käsittää levymäisen, oven karmina toimivan reunaosan ja levymäisestä reunaosasta raolla erotetun oven.

12. Patenttivaatimuksen 11 mukainen anturi, **tunnettu** siitä, että anturi on järjestetävissä fotoakustisen detektorin käsittämän tutkittavaa kaasua sisältävän kammion yhteyteen siten, että kammiossa absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon aikaansaamat painevaihtelut liikuttavat ovea.

13. Patenttivaatimuksen 11 tai 12 mukainen anturi, **tunnettu** siitä, että anturi ei käsitä siihen kiinteästi kiinnitettyjä ja/tai kiinteästi sen yhteyteen järjestettyjä antureita oven liikkeen havaitsemiseksi ja/tai mittaamiseksi.

14. Menetelmä fotoakustisen detektorin anturina käytettävän oven optimoinnissa, **tunnettu** siitä, että oven liikkeen amplitudin optimointi suoritetaan käyttämällä optimointiyhtälöä:

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega_0^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

kun $\omega < \omega_0$

$$A_x(\omega) \approx \frac{p_0 \Delta T / T_0}{\rho d \omega^2 + \frac{p_0 A}{2V_0}},$$

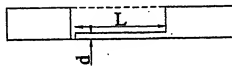
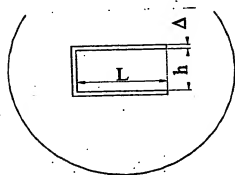
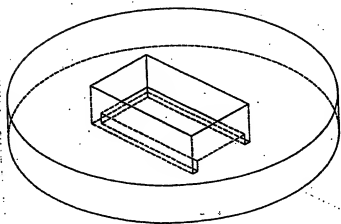
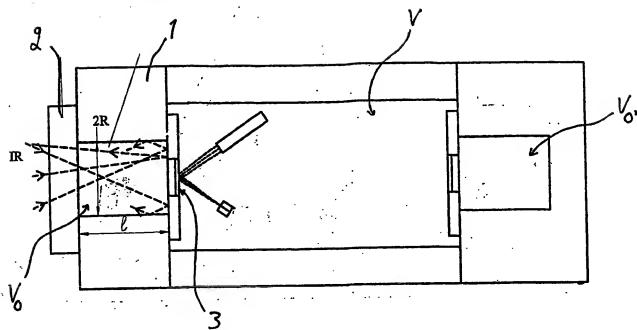
kun $\omega > \omega_0$.

15. Patenttivaatimuksen 14 mukainen menetelmä, **tunnettu** siitä, että amplitudin $A_x(\omega)$ optimointi suoritetaan ω_0 , A :n ja d :n avulla, erityisesti pyrkimällä pienentämään niiden arvoja.

Tiivistelmä

Keksinnön kohteena on fotoakustinen detektori, joka käsittelee ainakin ensimmäisen kammion (V_0), johon tutkittavaa kaasua voidaan johtaa, ikkunan moduloidun ja/tai pulssitetun infrapunasäteilyn ja/tai valon päästämiseksi ensimmäiseen kammioon (V_0), ja välineet absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden havaitsemiseksi. Välineet absorboituneen infrapunasäteilyn ja/tai valon ensimmäiseen kammioon aikaansaamien painevaihteluiden havaitsemiseksi käsittävät ainakin ensimmäisen kammion (V_0) seinämään järjestetyn aukon, jonka yhteyteen on kaasun liikkeestä liikkuvaksi järjestetty ovi, ja välineet oven liikkeen kosketusettomaksi mittaamiseksi. Lisäksi keksinnön kohteena on fotoakustisen detektorin anturi ja menetelmä fotoakustisen detektorin anturina käytettävän oven optimoinnissa.

Fig. 1



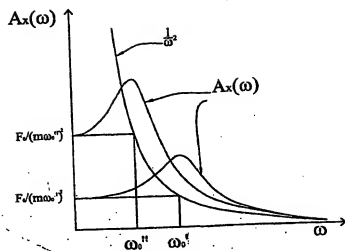


Fig. 4a

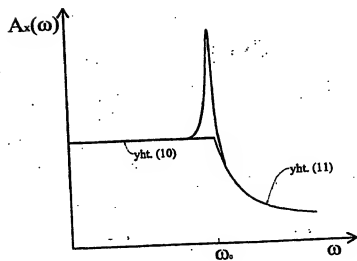


Fig. 4b

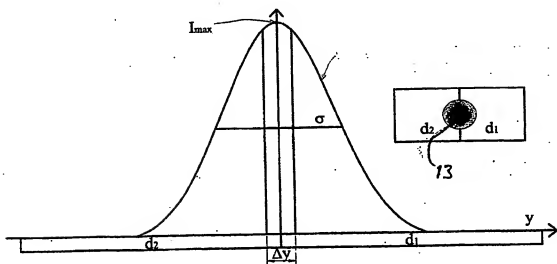


Fig. 6

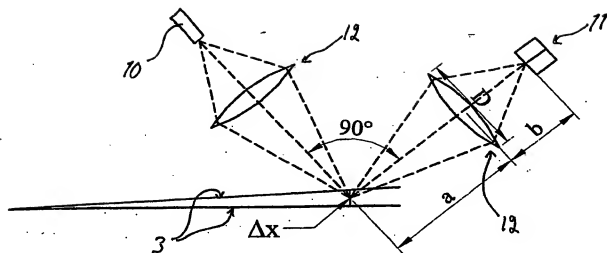


Fig. 7

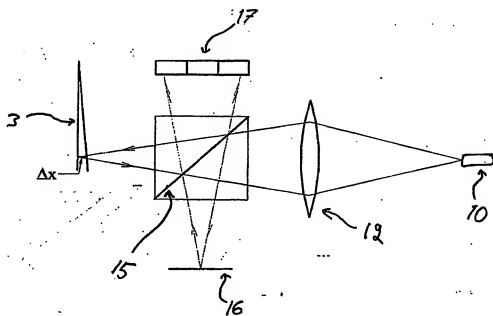
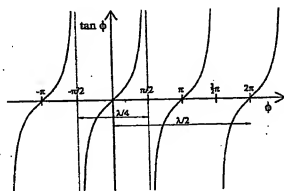
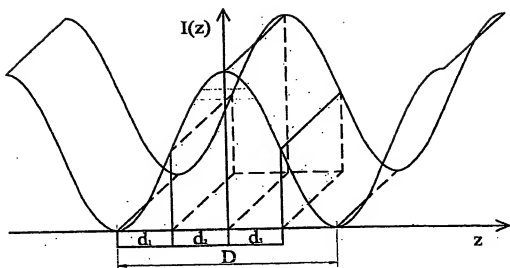
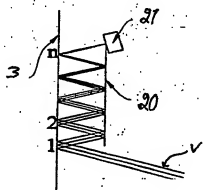
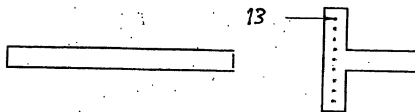
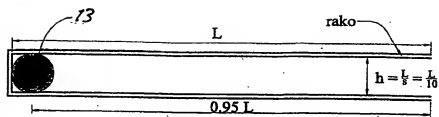


Fig. 8





**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.